

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ

А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Анализ работы электромашинных усилителей с поперечным полем показывает, что они имеют ряд недостатков, связанных, главным образом, с процессом коммутации. К таким недостаткам относятся:

1. Тяжелые условия коммутации. Обусловлены они спецификой работы и устройства усилителя.
2. Возможная нестабильность работы, связанная с изменением переходного сопротивления щеточного контакта.
3. Размагничивающее действие коммутационных токов в поперечной цепи.
4. В тесной связи с указанными недостатками находятся повышенный вес, размеры и стоимость усилителя.

Перечисленные недостатки ограничивают возможность повышения скорости, мощности, плотности тока, уменьшения габаритов, повышения стабильности работы усилителя.

Несмотря на наличие дополнительных полюсов по продольной оси, а иногда наличия последовательной обмотки в поперечной цепи, коммутация в усилителях часто является неудовлетворительной и служит основным ограничением в работе усилителя.

Удовлетворительная коммутация является необходимым условием нормальной и длительной работы любой машины постоянного тока.

Являясь машиной постоянного тока, электромашинный усилитель с поперечным полем имеет свои специфические особенности устройства и работы, которые отражаются и на процессе коммутации.

Особенность коммутации в усилителях обусловлена наличием поперечных короткозамкнутых и продольных щеток, наличием нескольких обмоток на статоре, каждая из которых оказывает свое влияние на процесс изменения тока в секции.

При аналитическом и экспериментальном исследовании коммутации в усилителях с поперечным полем возможен путь раздельного исследования коммутации в поперечной и продольной цепях, а затем при одновременной работе поперечных и продольных щеток.

Экспериментальное исследование коммутации в поперечной цепи проводилось при следующих условиях:

1. Продольные щетки сняты.

2. В поперечной цепи установлены щетки шириной, равной коллекторному делению.

3. Питание к обмотке якоря подводится от постороннего источника.

Осциллографирование кривых тока и э. д. с. проводилось при длительном режиме работы, установившемся тепловом состоянии коллектора и стабильном характере кривых тока и э. д. с.

При таких условиях процесс изменения тока под щетками в поперечной цепи будет определяться индуктивностью секции, ее активным сопротивлением, переходным сопротивлением щеточного контакта и полем якоря в поперечной цепи.

На рис. 1 представлена кривая тока при  $I_q = 2a$ .

Из рисунка видно, что процесс изменения тока в секции носит явно выраженный замедленный характер. Условия работы сбегавшего края щетки получаются гораздо тяжелее, чем набегающего. Замедле-

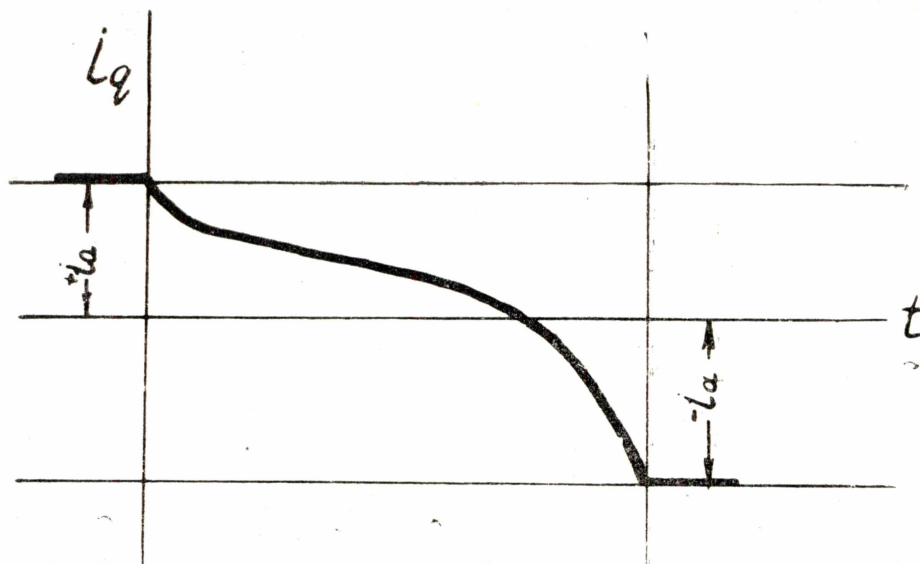


Рис. 1. Кривая тока поперечной цепи при  $b_{ш} = b_k$ .

ние коммутации обусловлено индуктивностью секции и полем якоря. Хотя величина последнего и небольшая, но она оказывает существенное влияние. Такой характер кривой тока является нежелательным, но он имеет место, так как в поперечной цепи нет никаких дополнительных средств, изменяющих характер кривой тока коммутируемой секции. При такой коммутации обязательно имеет место искрение сбегавшего края щетки и размагничивающее действие коммутационного тока.

Работа поперечных щеток несколько облегчается лишь за счет того, что величина тока в поперечной цепи небольшая. Любое увеличение тока при таком характере кривой безусловно будет связано с ухудшением работы щеток и увеличением искрения.

Применяемая для улучшения коммутации последовательная обмотка, включаемая в поперечную цепь, не изменяет характера кривой тока коммутируемой секции. С увеличением числа витков в поперечной цепи при меньшем токе сохраняется необходимая величина н. с. И только за счет уменьшения величины тока коммутация в поперечной цепи несколько улучшается при неизменном замедленном характере изменения тока.



Но одновременно с подключением последовательной обмотки увеличивается постоянная времени поперечной цепи и уменьшается быстродействие, что является нежелательным.

На рис. 2 изображены кривые э. д. с. от коммутируемых секций. Находятся они во впадине кривой поля, которая соответствует зоне большого паза. В этой зоне размещены поперечные щетки. В кривых э. д. с. наблюдаются явно выраженные пики, соответствующие набегавшему (пик *a*) и сбегавшему (пик *б*) краям щетки.

О характере коммутации можно судить и по этим кривым. Из них видно, что более резкий спад тока происходит на сбегавшем крае, чему и соответствует значительная величина пика.

Безусловно, самым эффективным средством улучшения коммутации является изменение характера кривой тока (приближение его к прямолинейному) за счет внешних средств, компенсирующих действие поля якоря и реактивной э. д. с.

В связи с этим была собрана экспериментальная установка на базе ЭМУ-12А, в котором дополнительные полюсы из продольной цепи были перемещены в поперечную. При этом также осциллографировались кривые тока и поля.

При токе в поперечной цепи  $I_q = 1, 2; 1, 5; 2a$  и отсутствии тока в обмотке дополнительных полюсов ( $I_{д.п.} = 0$ ) осциллограмма кривой тока коммутируемой секции представлена на рис. 3.

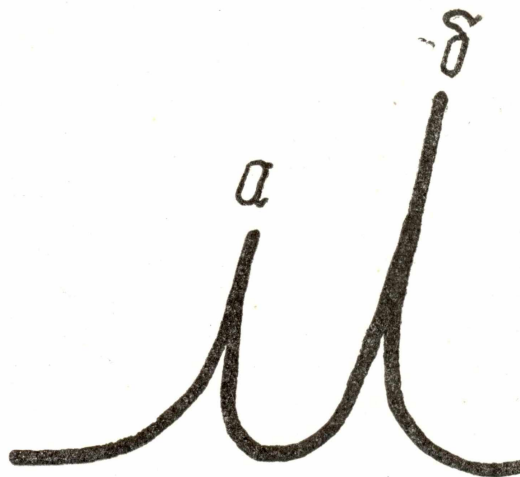


Рис. 2. Кривые э. д. с. коммутируемых секций в поперечной цепи.

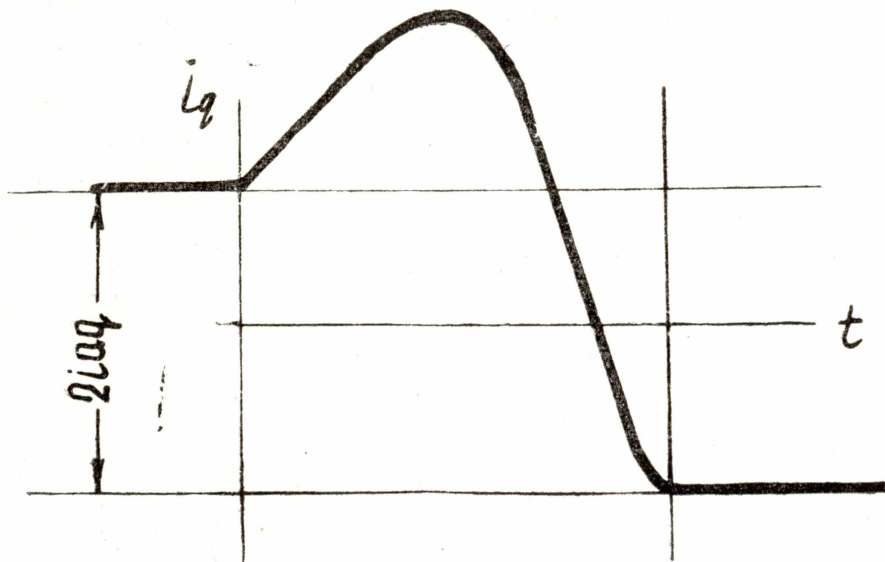


Рис. 3. Кривая тока поперечной цепи при  $I_{д.п.} = 0$ .

Изменение тока в соответствии с кривой рис. 3 носит еще более замедленный характер, чем на рис. 1. Искрение (весьма интенсивное) происходит под всей поверхностью щетки. Длительная работа усили-

теля при таком характере коммутации в поперечной цепи, безусловно, невозможна.

Тяжелые условия коммутации в этом случае можно объяснить тем, что зазор в поперечной цепи при наличии дополнительных полюсов уменьшился, а коммутирующее поле при  $I_{д.п.} = 0$  отсутствует.

Подключением обмотки дополнительных полюсов представляется возможным регулировать условия коммутации в поперечной цепи, т. е. видоизменять характер кривых тока и поля. При определенной величине тока в поперечной цепи получается прямолинейная коммутация со всеми очевидными преимуществами. При ней искрение под поперечными щетками почти отсутствует. Под сбегаящим краем наблюдаются одна, две маленьких искрящихся точки, появление которых можно объяснить за счет влияния механических факторов.

Таким образом, с помощью дополнительных полюсов в поперечной цепи представляется возможным получить удовлетворительные условия коммутации. При этом возможно повышение токовой нагрузки.

В [1] изложены результаты исследования коммутации в продольной цепи при разомкнутых поперечных щетках. При этом устанавливается, что условия коммутации в продольной цепи определяются в основном компенсационной обмоткой. Определяется диапазон настройки компенсации, при которой имеет место удовлетворительная коммутация.

В связи с этим было проведено исследование коммутации в продольной цепи при удаленных дополнительных полюсах и, следовательно, с увеличенным пазом по продольной оси. Кривая тока при этом при отключенной компенсационной обмотке принимает вид, аналогичный кривой рис. 1. Хотя коммутация в продольной цепи и остается замедленной, но условия работы продольных щеток значительно облегчаются по сравнению с приведенными в [1].

При подключении компенсационной обмотки и определенной степени компенсации продольной реакции якоря характер коммутации в продольной цепи заметно изменяется. При недокомпенсации порядка 15% коммутация получается почти прямолинейной и щетки работают без искрения. При увеличении тока в 1,5—2 раза коммутация также остается удовлетворительной.

Прямолинейному изменению тока в секцию соответствует кривая поля (рис. 4). Коммутационные пики в кривой отсутствуют. Зубчатость кривой объясняется наличием зубцов на статоре.

На рис. 5. представлена кривая поля компенсационной обмотки, полученная при отсутствии щеток на коллекторе. Впадины кривой соответствуют увеличенным пазам продольной цепи.

Таким образом, в продольной цепи получение удовлетворительной коммутации при отсутствии дополнительных полюсов с помощью только компенсационной обмотки вполне возможно.

Для проверки результатов, полученных при раздельном исследовании коммутации в поперечной и продольной цепях, было проведено исследование при одновременной работе поперечных и продольных щеток. Специфика работы усилителя заключается в том, что по обмотке якоря протекают токи, обусловленные полем обмотки управления и полем поперечной реакции якоря. Это создает неравномерное распределение тока по обмотке якоря.

Исследование обычного усилителя проводилось при следующих условиях:

1. Щетки шириной, равной коллекторному делению, были установлены на нейтрале.



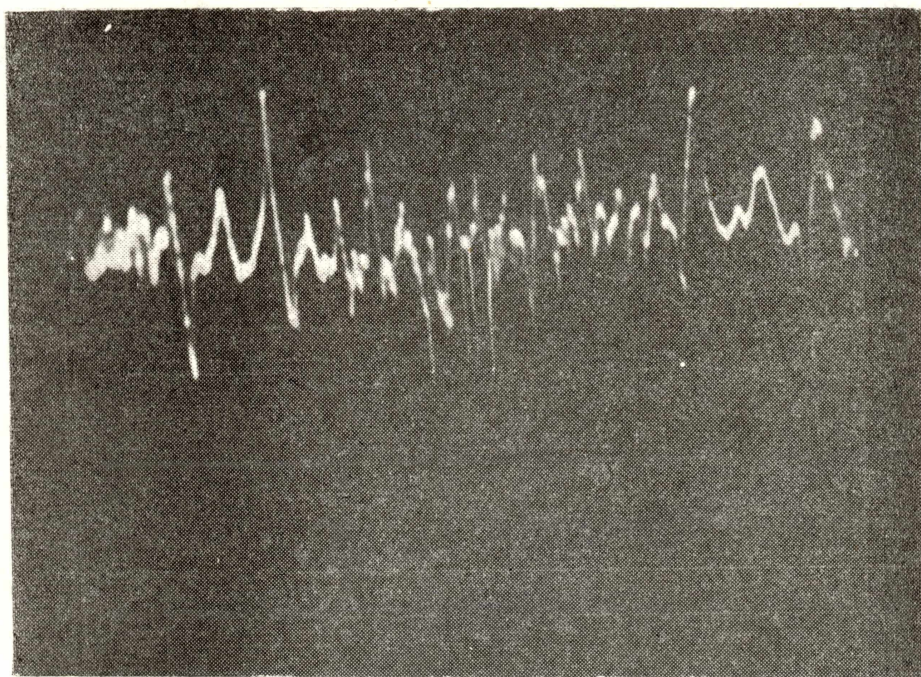


Рис. 4. Кривая поля в продольной цепи при прямолинейном изменении тока.

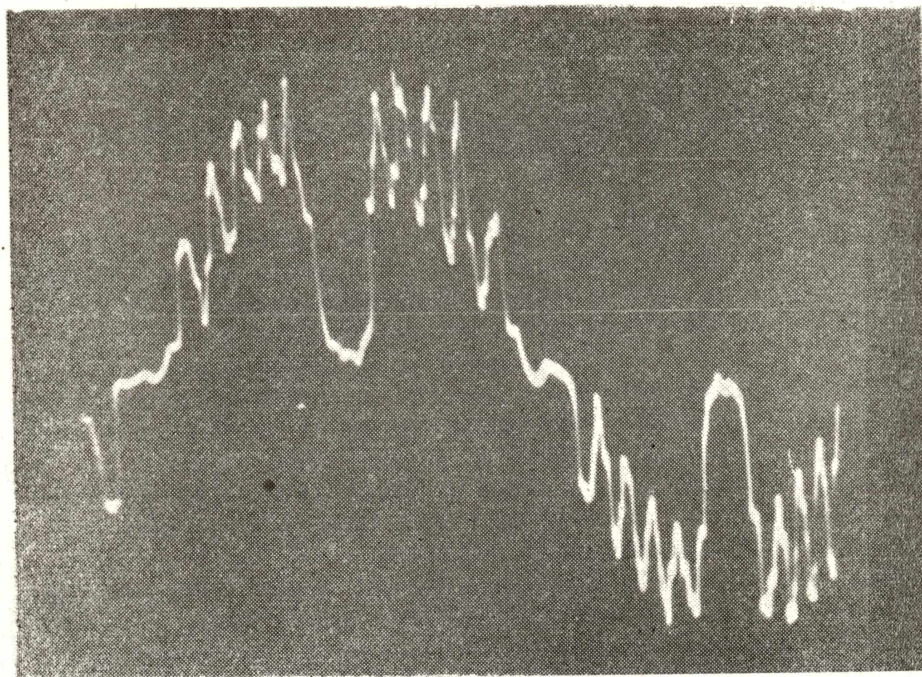


Рис. 5. Кривая поля компенсационной обмотки.



2. С помощью шунтирующего сопротивления настроена нормальная компенсация.

3. В поперечной цепи установлен ток  $I_q = 1,2 a$ , в продольной —  $I_d = 4 a$ .

На рис. 6 представлены кривые токов в поперечной и продольной цепях усилителя. При этом кривая I вполне соответствует кривой рис. 1 для поперечной цепи, полученной при раздельном исследовании коммутации. Соответствие и на самом деле должно иметь место, так как в обоих случаях характер коммутации в основном определяется параметрами коммутируемого контура и полем якоря, которые остаются одинаковыми как при раздельном исследовании коммутации, так и при совместной работе поперечных и продольных щеток.

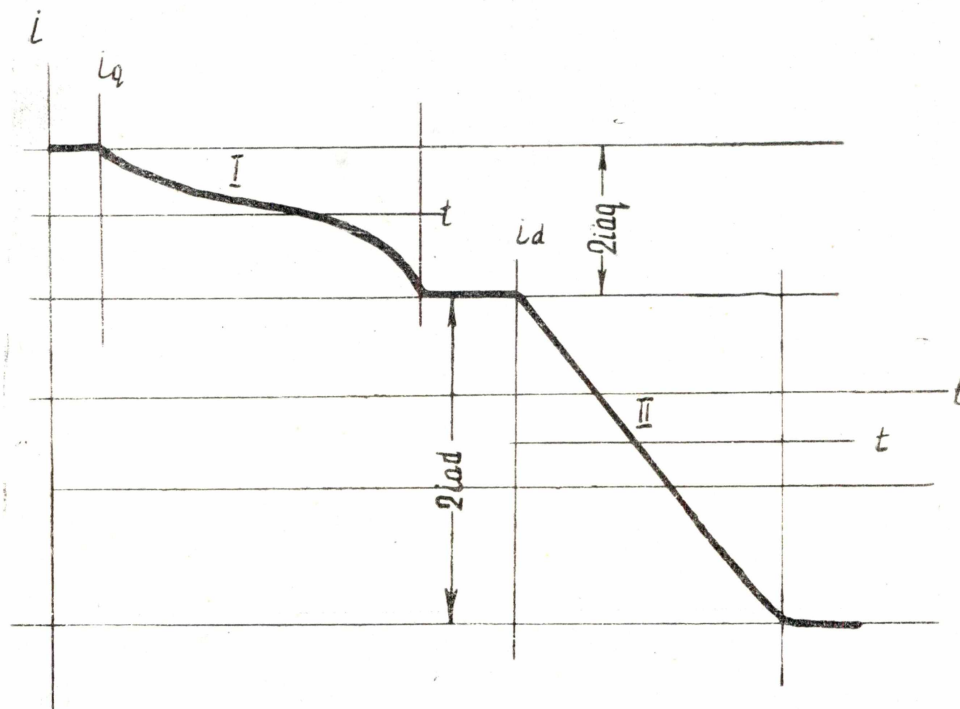


Рис. 6. Кривые токов при одновременной работе поперечных и продольных щеток.

Только необходимо иметь в виду, что при совместной работе поперечных и продольных щеток в контуре секции, коммутируемой поперечными щетками, присутствует составляющая ( $i_{ad}$ ) тока продольной цепи. О влиянии этой составляющей будет сказано несколько ниже.

Кривая II (рис. 6) приближается к прямолинейной зависимости. Такого же вида были получены кривые тока для нормальной компенсации при исследовании коммутации только в продольной цепи (при разомкнутых поперечных щетках). В действительности так должно и получиться. Условия коммутации в продольной цепи обычного усилителя определяются параметрами коммутируемого контура, полем якоря, полем компенсационной обмотки и в какой-то мере полем дополнительных полюсов. Все эти факторы имеют место как при раздельной, так и при совместной работе поперечных и продольных щеток. Здесь также необходимо иметь в виду, что в контуре секции, коммутируемой продольными щетками (при одновременной работе поперечных и продольных щеток), присутствует составляющая ( $i_{aq}$ ) тока поперечной цепи.



Соответствие кривых рис. 6 кривым, полученным при раздельном исследовании, может служить подтверждением сделанных ранее выводов об условиях коммутации в поперечной и продольной цепях усилителя.

Очевидно, при исследовании процесса коммутации в электромашинных усилителях с поперечным полем представляется возможным проводить раздельный анализ коммутации в поперечной и продольной цепях, а затем переходить к более сложным условиям—работе под нагрузкой.

Было проведено исследование коммутации при работе под нагрузкой в усилителе с перемещенными дополнительными полюсами, т. е. когда дополнительные полюсы из продольной цепи были удалены и установлены в поперечной. В этом случае в поперечной цепи усилителя настраивалась прямолинейная коммутация с помощью дополнительных полюсов, а в продольной—с помощью компенсационной обмотки. При этом поперечные и продольные щетки работают почти без искрения, что является подтверждением результатов, полученных при раздельном исследовании коммутации.

Влияние  $i_{ad}$  и  $i_{aq}$  в соответствующих цепях можно проверить, исходя из положений классической теории коммутации.

Для коммутируемого контура поперечной цепи (рис. 7) при  $b_{\text{ш}} = b_{\text{к}}$  может быть составлено уравнение:

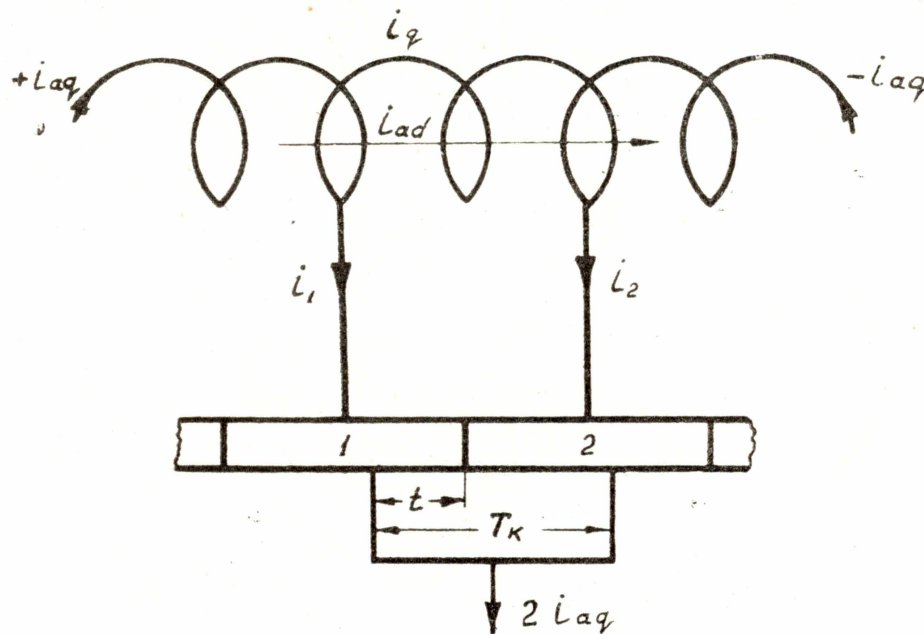


Рис. 7. Схема коммутируемого контура поперечной цепи.

$$r_c(i_q + i_{ad}) + i_2 r_2 - i_1 r_1 = e_{zq}. \quad (1)$$

Для коммутируемого контура продольной цепи (рис. 8) при  $b_{\text{ш}} = b_{\text{к}}$  уравнение имеет вид

$$r_c(i_d + i_{aq}) + i_2 r_2 - i_1 r_1 = e_{zd}. \quad (2)$$

Здесь

$$i_1 = i_{aq} - i_q, \quad i_1 = i_{ad} - i_d, \quad r_1 = r_{\text{ш}} \frac{T_k}{t}, \quad e_{zq} = e_r + e_q;$$

$$i_2 = i_{aq} + i_q, \quad i_2 = i_{ad} + i_d, \quad r_2 = r_{\text{ш}} \frac{T_k}{T_k - t}, \quad e_{zd} = e_r \pm e_k.$$

На рисунках и в уравнениях приняты обозначения:  
 $i_q, i_d$  — токи коммутируемых секций в поперечной и продольной цепях;  
 $i_{aq}, i_{ad}$  — токи параллельных ветвей, соответствующие поперечной и продольной цепям;  
 $r_1, r_2$  — сопротивления щеточного контакта, соответствующие набегающему и сбегающему краям щеток;  
 $e_r$  — реактивная э. д. с.;  
 $e_q$  — э. д. с. от поля якоря в поперечной цепи;  
 $r_{\text{ш}q}, r_{\text{ш}d}$  — сопротивления, соответствующие полной ширине щетки, в продольной и поперечной цепях;  
 $e_{zq}, e_{zd}$  — суммарные э. д. с. в поперечной и продольной цепях;  
 $i_1, i_2$  — токи, соответствующие набегающей и сбегающей частям щетки;  
 $T_K$  — период коммутации;  
 $t$  — время от начала коммутации;  
 $r_c$  — сопротивление секции;  
 $b_{\text{ш}}, b_K$  — ширина щетки и коллекторного деления.  
 После преобразования и решения уравнений (1), (2) для токов  $i_q$  и  $i_d$  получаются следующие выражения:

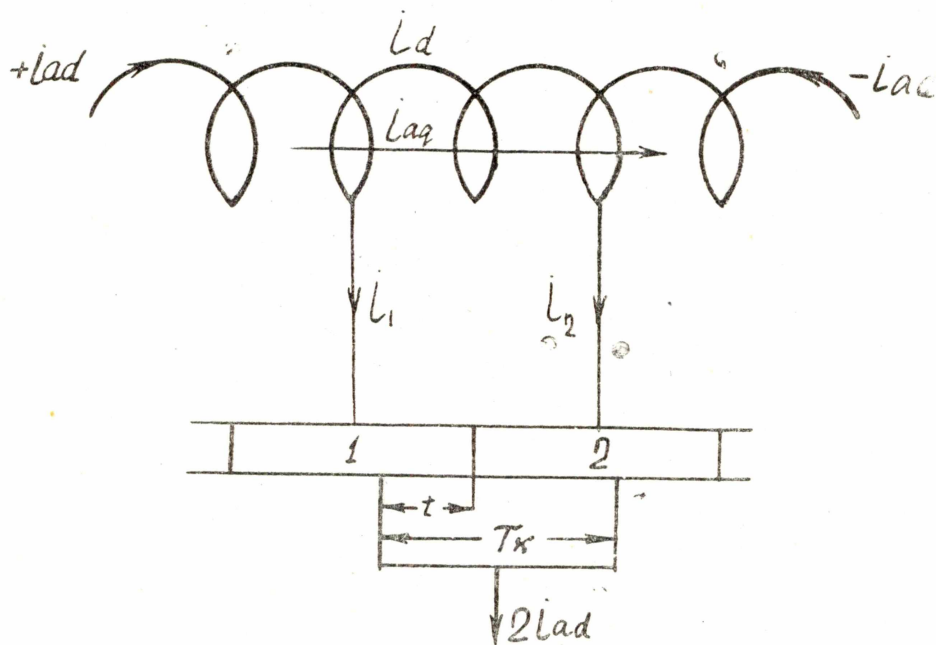


Рис. 8. Схема коммутируемого контура продольной цепи.

$$i_q = \frac{e_{zq}(T_K - t)t}{r_c(T_K - t)t + r_{\text{ш}q}T_K^2} - i_{aq} \frac{2r_{\text{ш}q}T_K t - r_{\text{ш}q}T_K^2}{r_c(T_K - t)t + r_{\text{ш}q}T_K^2} - i_{ad} \frac{r_c(T_K - t)t}{r_c(T_K - t)t + r_{\text{ш}q}T_K^2}; \quad (3)$$

$$i_d = \frac{e_{zd}(T_K - t)t}{r_c(T_K - t)t + r_{\text{ш}d}T_K^2} - i_{ad} \frac{2r_{\text{ш}d}T_K t - r_{\text{ш}d}T_K^2}{r_c(T_K - t)t + r_{\text{ш}d}T_K^2} - i_{aq} \frac{r_c(T_K - t)t}{r_c(T_K - t)t + r_{\text{ш}d}T_K^2}. \quad (4)$$



Решение выражений (3) и (4) проводится для следующих данных:

$$\begin{aligned} r_c &= 0,1 \text{ ома}, & i_{aq} &= 0,6 \text{ а}, \\ L_c &= 1,48 \cdot 10^{-4} \text{ гн}, & i_{ad} &= 2 \text{ а}, \\ T_k &= 4,61 \cdot 10^{-4} \text{ сек}, & e_{zq} &= 0,58 \text{ в}, \\ & & r_{mq} &= 0,84 \text{ ома}, \\ & & r_{md} &= 0,61 \text{ ома}. \end{aligned}$$

Решение уравнения (4) проводится при условии

$$e_{zd} = e_r - e_k = 0.$$

На рис. 9 представлены кривые токов  $i_q$  и  $i_d$ , полученные с учетом  $i_{ad}$  и  $i_{aq}$  в соответствующих цепях. Из них кривые (1) получены с учетом  $i_{ad}$  и  $i_{aq}$ , а кривые (2) — без учета  $i_{ad}$  и  $i_{aq}$ .

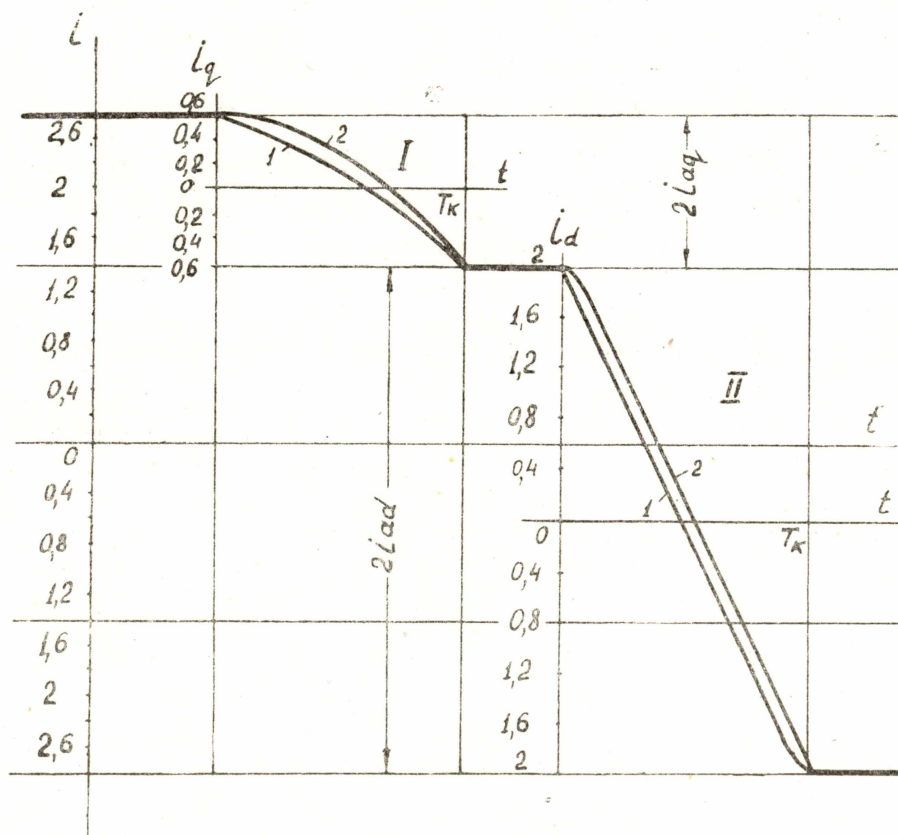


Рис. 9. Расчетные кривые токов с учетом одновременной работы поперечных и продольных щеток.

Сравнение кривых показывает, что составляющие  $i_{ad}$  в коммутируемом контуре поперечной цепи и  $i_{aq}$  в контуре продольной цепи оказывают ускоряющее действие на изменение тока в секции.

На рисунке участок I соответствует зоне поперечных щеток, а участок II — зоне продольных щеток.

Изменение тока в поперечной цепи носит замедленный характер. Причем это замедление несколько уменьшается в связи с действием  $i_{ad}$ .

В продольной цепи настраивается почти прямолинейное изменение тока. Причем кривая ( $I$ ) соответствует более ускоренному изменению тока в связи с действием  $i_{aq}$ .

То же самое можно видеть при качественном сравнении кривых тока, полученных при раздельном исследовании коммутации (рис. 1) и совместной работе поперечных и продольных щеток (рис. 6).

Таким образом, проводя раздельное исследование коммутации в поперечной и продольной цепях при одновременной работе поперечных и продольных щеток следует учитывать ускоряющее влияние токов  $i_{ad}$  и  $i_{aq}$  в соответствующих коммутируемых контурах. Только нужно иметь в виду, что ускоряющее действие от токов  $i_{ad}$  и  $i_{aq}$  сравнительно небольшое.

В целом по результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. В электромашинных усилителях с поперечным полем возможно раздельное исследование коммутации в поперечной и продольной цепях с переходом к более сложному случаю при одновременной работе поперечных и продольных щеток.

2. В электромашинных усилителях с поперечным полем возможно получение удовлетворительной коммутации в поперечной цепи с помощью дополнительных полюсов и в продольной с помощью компенсационной обмотки.

3. Составляющие  $i_{ad}$  и  $i_{aq}$  в соответствующих контурах коммутируемых секций оказывают сравнительно небольшое ускоряющее действие.

#### ЛИТЕРАТУРА

А. И. Скороспешкин. Некоторые результаты экспериментального исследования процесса коммутации в ЭМУ с поперечным полем. „Электромеханика“, № 11, 1959.

Поступила в редакцию  
в июне 1962 г.